한국소음진동공학회지 제 7 권 제 2 호, pp. 255~260, 1997.

〈논 문〉

소음원 영상화를 위한 마이크로폰 배열 설계

Microphone Array Design for Noise Source Imaging

윤 종 락* · S. A. L Glegg**
Jong-Rak Yoon and Stewart A. L. Glegg

(1996년 11월 8일 접수 ; 1997년 2월 18일 심사완료)

Key Words : Noise Source Detection(소음원탐지), Noise Control(소음제어), Source Imaging(음원 영상화), Array Design(배열설계), Correlation Function(상관 함수), Acoustic Camera(음향카메라)

ABSTRACT

This paper describes 3-dimensional volume array of 4 microphones including a reference microphone which is capable of imaging wideband noise source position in 2-dimensional image plane. The cross correlation function and corresponding imaging function between a reference microphone and other microphone, are derived as a function of noise source position. The magnitude of the imaging function gives noise source mapping in image plane. Since the image plane is selective from a rectangular and a cylindrical plane, noise source position information such as range and bearing relative to the array is identified very much easily. Simulation results for typical source configurations confirms the applicability of the proposed array in noise control field.

1. 서 론

소음원의 위치탐지나 음향특성해석을 위한 배열시스템으로는 군용의 능동 및 수동소나, 음향홀로그래피, 음향인텐시티기술등이 있고 이들은 배열신호로부터 유도되는 상호상관함수 처리 혹은 전통적인 빔형성기술로부터 소음원 정보를 획득하고 있다[1]. 그러나 이들 시스템을 이용하여 3차원 공간상의 소음원 위치 정보를 얻기 위해서는 배열개구(Array aperture) 방향을 소음원이 존재할 것으로 예측되는 방향으로 향하도록 해야 하며 배열처리 과정이 복잡하다. 이와 더불어 또한 예인형 수동소나나 음향 홀로그래피등에서는 배열개구방향이 아예 고정되어 있어 제한된 공간만의 소음원 정보를 획득할 수밖에 없다.

본 연구에서는 소음원이 광대역 특성을 갖는다는 가정하에 배열을 3차원으로 배열하여 배열과 소음원의 상대 위치에 관계없이 전 방위 공간의 소음원 동정이 해석 될 수 있도록 하였다.

소음원의 2차원 영상화에 대한 최근의 연구는 수중 음향카메라에 대한 연구로 Gleggㅘ Buckingham[2]은 해양배경잡음에 의한 표적체의 산란 음향강도 및 음향대비를 예측할 수 있는 이론을 정립하여 음향반사경 및 수신기로 구성되는 음향카메라를 이용하면 표적체의 영상화가 가능 하다고 제안하였다. 이와 더불어 공기 중 잔향 음장내에 존재하는 음향표적체를 대상으로 제안된 기법을 검증하였고 음향카메라의 구현 가능성을 확인하였다.

Buckingham[3] 등은 또한 수중실험을 행하여 수중음향카메라의 기초적 영상기술을 제시하였으며 영상분해능개선을 위해 고주파수신호를 수신 처리해야 하지만 해양배경잡음의 강도는 주파수에 반비례하므

*정회원, 부경대학교 정보통신공학과
**Dept. of Ocean Engr. Florida Atlantic University.

로 저주파수 신호를 이용하는 것이 유리하다고 발표하였다. 그러나 이러한 경우 수신 시스템(음향반사경, …)의 기하학적 크기를 증대시켜야 한다는 제한점을 지적하였다.

Makris[4] 등은 해양표면의 소음원에 의한 표적체의 탐지 가능성을 수치모의 실험으로 연구하여 최적의 탐지는 저주파수대역에서 가능함을 발표하였다.

Potter[5] 등은 126개의 화소(pixel)에 의한 표적체의 영상화 시스템을 수치모의 실험으로 연구하였다. 각 화소에 대응되는 수신기는 음향 반사경의 촛점에 설치하고 각 화소의 색깔과 밝기는 스펙트럼 세기에 의해 결정되도록 하였다.

이상의 연구들[2~5]은 소음원의 영상 즉 화소의 특성이 주파수대역 스펙트럼세기에 의해 결정되는 무상관 영상기술에 기초한 것으로 영상분해능은 각 화소에 대응되는 배열의 갯수에 일차적으로 좌우되어 분해능을 높이기 위한 배열의 갯수 증대가 수신 신호의 실시간처리에 가장 큰 제한점으로 작용하고 아울러 배열개구는 표적소음원 방향으로 향하여야 하는 제한점을 갖는다. 이 외에도 1차원 선형배열을 이용한 소음원의 방위탐지에 관한 연구[6]가 있으나 소음원의 방위가 유일하게 결정되지 못하는 배열시스템이다.

이러한 제한점을 극복하려는 시도가 본 연구자들이 제안하는 기법으로 제안된 3차원배열기술은 각 배열요소간의 시간영역 상관함수 및 대응되는 영상함수를 실시간으로 처리하여 영상면에 소음원 위치정보를 맵핑하는 기술이다. 또한 영상면은 임의방향의 사각면 혹은 360° 전방위 원통면으로 선택가능하여 소음원의 3차원적 동정해석에 유용하다.

2. 배열센서 수신신호의 상호상관함수특성

Fig. 1과 같이 두 개의 마이크로폰을 고려하고 표적소음원들은 무상관 광대역 소음원으로 가정한다. 기준마이크로폰은 좌표기준점에 위치하고 제2의 마이크로폰은 d_1 위치에 있다. 그림에서 각 소음원의 위치와 체적속도는 각각 r_n 및 $Q_n(t)$ $(n=1, 2, \cdots, N)$으로 정의된다. 따라서 기준 마이크로폰 및 제2의 마이크로폰에서 측정되는 음압 $P_0(t)$ 및 $P_1(t)$는 다음식으로 주어진다[7].

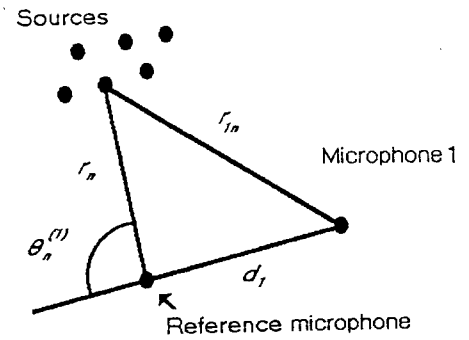

Fig. 1 Two microphone array and uncorrelated wideband distributed sources

$$P_0(t)=\sum_{n=1}^{N}\frac{\rho\dot{Q}_n\left(t-\frac{|r_n|}{c_0}\right)}{4\pi|r_n|} \tag{1}$$

$$P_1(t)=\sum_{n=1}^{N}\frac{\rho\dot{Q}_n\left(t-\frac{|r_n|}{c_0}\right)}{4\pi|r_n|} \tag{2}$$

여기서, $r_{1n}=r_n-d_1$

따라서 두 마이크로폰간의 상호상관함수 $R_1(\tau)$는 다음식으로 주어진다.

$$=\frac{1}{T}\int_0^T\sum_{n=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{\rho^2\dot{Q}_n\left(t-\frac{|r_n|}{c_0}\right)\dot{Q}_m\left(t-\frac{|r_{1m}|}{c_0}+\tau\right)}{16\pi^2|r_n||r_{1m}|}dt$$

$$R_1(\tau)=\frac{1}{T}\int_0^T P_0(t)\,P_1(t+\tau)\,dt \tag{3}$$

n번째와 m번째 소음원간의 상호상관함수를 $D_{nm}(\tau)$를 정의하면

$$D_{nm}(\tau)=\frac{1}{T}\int_0^T\rho^2\dot{Q}_n(t)\,\dot{Q}_m(t+\tau)\,dt \tag{4}$$

각 소음원은 무상관이므로,

$$D_{nm}(t)=\begin{cases}D_n(t)\neq 0 \text{ if } n=m,\\ 0 \text{ if } n\neq m.\end{cases} \tag{5}$$

배열의 크기가 소음원이 위치한 거리에 비해 무시될 수 있는 경우($|d_1|\ll|r_n|$) 식 (4) 및 (5)에 의해 식 (3)은 다음식으로 변환된다.

$$R_1(\tau)=\sum_{n=1}^{N}\frac{D_n\left(\tau-\frac{|r_{1n}|-|r_n|}{c_0}\right)}{16\pi^2|r_n|^2}$$

$$=\sum_{n=1}^{N}\frac{D_n\left(\tau-\frac{d_1\cos(\theta_n^{(1)})}{c_0}\right)}{16\pi^2|r_n|^2} \tag{6}$$

여기서 $\theta_n^{(1)}$은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 마이크로폰간을 잇는 직선과 n번째 소음원이 이루는 위치각이다. n번째 소음원이 백색잡음의 특성일때 $D_n(\tau)$는 Dirac-delta 함수이고 따라서 식 (6)의 상호상관함수는 n번째 소음원에 대한 시간지연지수 τ_n은 다음조건을 만족하는 경우 첨두치를 가질 것이다.

$$\tau_n=\frac{|d_1|\cos(\theta_n^{(1)})}{c_0} \tag{7}$$

따라서 $\theta_n^{(1)}$을 상호상관함수로부터 구할 수 있을 것이다. 소음원이 백색잡음이 아닌 광대역 특성의 경우 $D_n(\tau)$는 Dirac-delta 함수와는 달라 상호상관함수가 극대값을 보이는 위치의 시간분해능은 소음원의 대역폭에 반비례[8] 하게 되지만 $D_n(\tau)$가 극대값을 갖는 τ를 구할 수 있고 또한 수신신호에 prewhitening기법[8]을 적용하면 Dirac delta 함수를 얻을 수 있을 것이다. 또한 prewhitening기법을 적용하지 않는 경우 첨두치의 시간분해정보는 각 소음원의 주파수 대역 특성해석에 응용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 prewhitening 기법을 적용하지 않은 결과를 제시한다.

3. 상호상관함수의 영상화 기법

식 (6)을 기준마이크로폰과 임의의 i번째 마이크로폰과의 상호상관함수에 적용하면 식 (7)로 부터 시간지연지수 $\tau_n^{(i)}$는 다음식으로 주어진다.

$$\tau_n^{(i)}=\frac{|d_i|\cos(\theta_n^i)}{C_0} \tag{8}$$

n번째 소음원에 의한 $\theta_n^{(i)}$는 Fig. 2(a)에 보이는 바와 같이 원호상에 위치하므로 한 쌍의 배열로는 소음원의 위치를 유일하게 결정할 수 없고 따라서 Fig. 2(c) 와 같이 최소한 세쌍의 배열이 있어야 소음원의 위치를 유일하게 결정할 수 있다.

Fig. 3 과 같이 기준마이크로폰으로부터 거리 f(촛점거리로 정의) 떨어진 사각영상면을 정의하고 영상면의 영상점을 $M * N$개 라하면 각 영상점은 Z_{sp} ($s=1, 2, 3, \cdots\cdots, M$, $P=1, 2, 3, \cdots\cdots, N$)로 주어진다. 따라서 영상면의 각 영상점 Z_{sp}와 i번째 마이크로폰쌍간의 시간지연지수 $\tau_{sp}^{(i)}$ 다음식으로 주어진다.

$$\tau_{sp}^{(i)}=\frac{|Z_{sp}-d_i|-|Z_{sp}|}{C_0} \tag{9}$$

또한 원거리 상의 r_n에 위치한 n번째 소음원은 Fig. 3과 같이 영상면에 투사되므로 소음원의 영상점은 다음식의 해로써 정의된다.

$$|Z_{sp}-d_i|-|Z_{sp}|=|r_n-d_i|-|r_n|=\tau_{sp}^{(i)}C_0 \tag{10}$$

상기의 식 (10)이 만족 될 때 상호상관함수 $R_i(\tau_{sp}^{(i)})$는 최대값을 갖게 될 것이다. 따라서 $R_i(\tau_{sp}^{(i)})$의 크기를 대응되는 Z_{sp}에 부가하면 소음원의 영상을 얻을 수 있다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 한 쌍의 마이크로폰에 의해서는 소음원의 위치가 유일하게 결정 될 수 없으므로 영상함수 V_{sp}를 다음 식으로 정의한다.

$$V_{sp}=\sum_{i=1}^{K} R_i(\tau_{sp}^{(i)}) \tag{11}$$

혹은

$$V_{sp}=\prod_{i=1}^{K}|R_i(\tau_{sp}^{(i)})| \tag{12}$$

여기서 K는 기준 마이크로폰을 제외한 마이크로폰의 갯수이다. 따라서 식 (11), (12)에 의해 주어지는 극대치들은 영상면에 소음원의 위치로 투사될 것

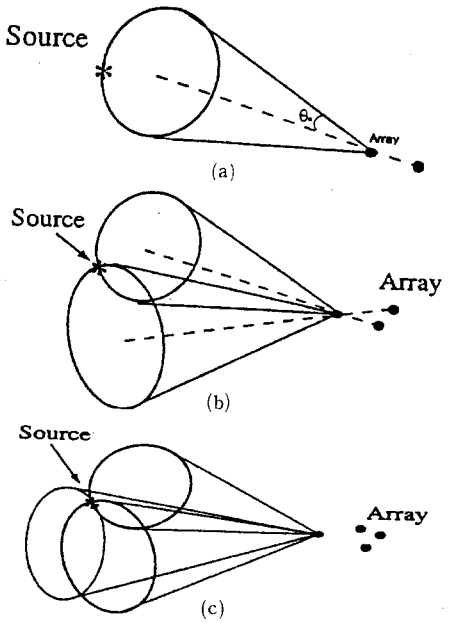

Fig. 2 Intersection of the conical surfaces which show the unique image of the noise source

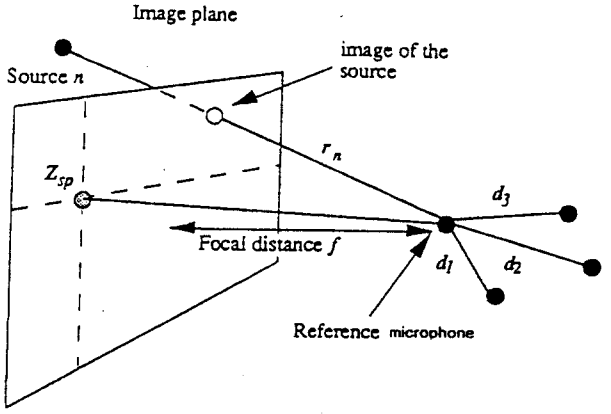

Fig. 3 Image plane and array for the noise source imaging

이다.

4. 배열센서의 수량 및 기하학적 크기 결정

앞 절 3.에서 기술한 바와 같이 소음원을 유일하게 결정하기 위해서는 최소한 3쌍의 마이크로폰이 소요되므로 기준 마이크로폰을 포함하여 4개의 마이크로폰이 필요하다. 그러나 두 개의 소음원이 특정 마이크로폰쌍과 일직선 상에 위치하는 경우나 서로 인접한 경우 두 개의 소음원을 분리하기 위해서는 상호상관 함수에서 각 소음원에 대응되는 상관함수의 극대치가 영상화 될 수 있도록 각각의 극대값을 갖도록 배열을 설계해야 한다. 따라서 두 개의 소음원이 일직선상에 위치하는 경우를 가정하여 추가의 마이크로폰 쌍이 필요할 것이다. 그러나 인접하는 소음원의 분리를 위해서는 소음원의 대역특성에 좌우되는 상관함수의 극대치 분해능과 마이크로폰간의 기하학적 거리에 대한 기하학적 해석이 필연적이다.

두 개의 인접소음원 K, L을 가정하고 각각의 영상점 위치를 Z_k, Z_l이라 하면 식 (7)로 부터 i번째 마이크로폰 쌍에 대한 시간지연지수는 각각 다음식으로 주어진다.

$$\tau_k^{(i)} = \frac{|Z_k - d_i| - |Z_k|}{C_0}$$
$$\tau_l^{(i)} = \frac{|Z_l - d_i| - |Z_l|}{C_0} \tag{13}$$

따라서 각 소음원에 대한 시간지연지수의 차는 다음식으로 주어진다.

$$\tau_k^{(i)} - \tau_l^{(i)} = \frac{|d_i|}{C_0}\{\cos(\theta_k^{(i)}) - \cos(\theta_l^{(i)})\} \tag{14}$$

$\theta_k^{(i)} = \theta_l^{(i)} - \Delta\theta$로 정의 하면 식 (14)는 다음식으로 근사된다.

$$\tau_k^{(i)} - \tau_l^{(i)} = \frac{|d_i|}{C_0}\Delta\theta\sin(\theta_l^{(i)}) \tag{15}$$

각 소음원 위치 정보를 상호상관 함수에서 각 소음원에 대한 극대치에 대응되는 시간지연지수를 분리할 수 있는 최소 시간차를 T라 하면 소음원의 각 분해능은 다음식으로 주어진다.

$$|\Delta\theta| > \left|\frac{TC_0}{d_i|\sin(\theta_l^{(i)})|}\right| \tag{16}$$

따라서 배열의 각 분해능은 마이크로폰간의 거리 $|d_i|$, 소음원 위치 $\theta_l^{(i)}$ 및 최소시간차 T에 의해 결정되고 시스템의 설계 단계에서 수행해야할 연구는 T의 값을 최소화 시키는 것으로 소음원이 백색잡음이 아닌 경우에 소음원의 중심 위치를 정확히 해석하기 위해서는 상호상관함수에 prewhitening기법 즉 Deconvolution 기법을 적용 할 수 있다. T가 결정되면 $|d_i|$ 및 $\theta_l^{(i)}$은 수치해석에 의해 최적화 될 수 있다.

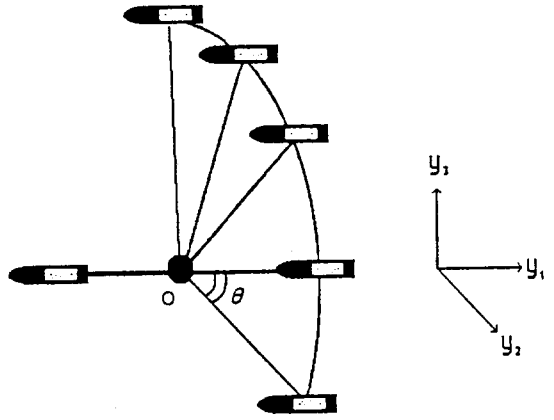

Fig. 4 Array configuration and the coordinate system

또한 배열마이크로폰이 대칭적으로 배열되면 배열중심을 기준으로 대칭위치에 존재하는 소음원은 유일하게 해석 될 수 없다. 따라서 배열 구조는 3차원 비대칭 구조로 설계돼야 한다.

Fig. 4는 배열설계기준에 따라 설계된 3차원 배열의 구조이다. 그림에서 기준점 O와 각 배열요소와의 거리는 약 2m, 부채꼴 형태로 구성되는 배열의 배열요소간 각도 θ는 약 36°이다.

5. 수치모의실험

Fig. 5(a)~(c)는 각각 한쌍, 두쌍, 및 세쌍의 배열로 처리된 단일 소음원의 영상으로 식 (12)로 처리된 결과이다. 3차원 공간에 위치하는 소음원에 대해 배열의 각 쌍은 서로 다른 영상함수를 갖지만 영상함수의 최대치가 교차하는 점이 소음원의 위치를 나타냄을 보인다. 그러나 획득한 영상함수는 임의방향으로 설정된 어떠한 영상면에도 적용되는 유일한 자료로 랜덤오차를 최소화하기 위한 목적이외에는 추가의 배열신호수신 및 처리는 불필요하다. Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 소음원에 대해 영상면을 원통형으로 한 경우로 배열에 대해 소음원의 위치는 360° 상대방위로 영상화 된다. 그림에서 배열의 위치는 원통면 내의 중심위치에 있다. Fig. 7 및 Fig. 8은 세 개의 소음원에 대한 사각면 및 원통면에 투사된 소음원의 영상으로 각 소음원의 대역 특성에 따라 영

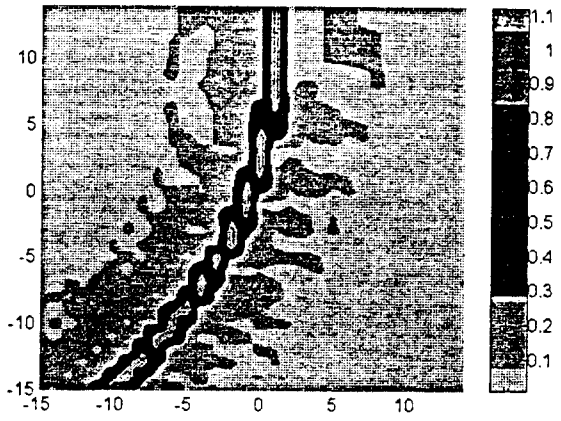

Fig. 5 (a) Source Image processed using a single pair microphones source position: $f=20$m $y_1=20$ m $y_2=0$m $y_3=0$m

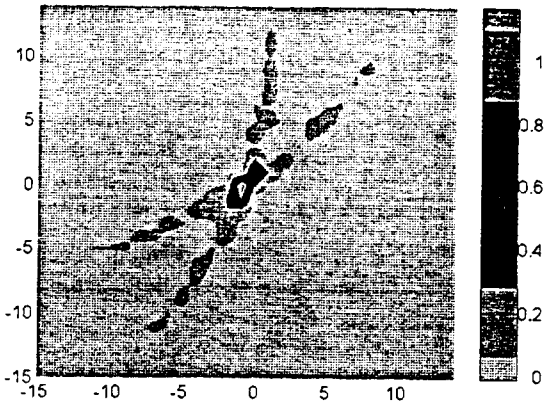

Fig. 5 (b) Source Image processed using two pairs of microphones source position: Same as that of Fig. 5(a)

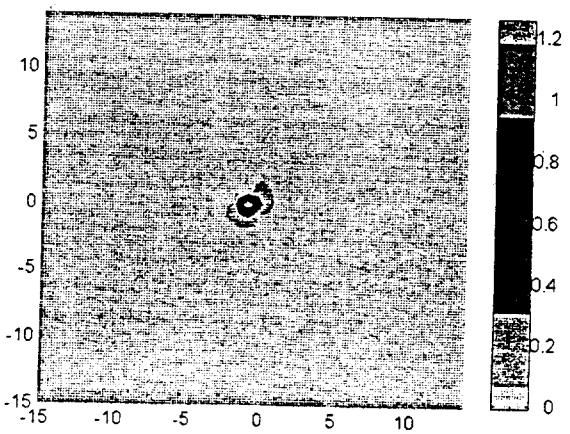

Fig. 5 (c) Source Image processed using three pairs of microphones source position: Same as that of Fig. 5(a)

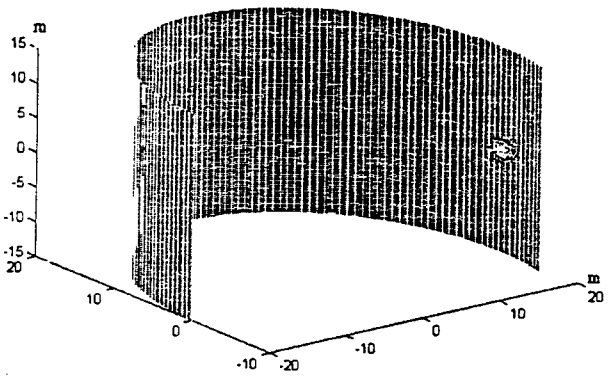

Fig. 6 Source Image processed in circular cylinderical surface source position: Same as that of Fig. 5(a)

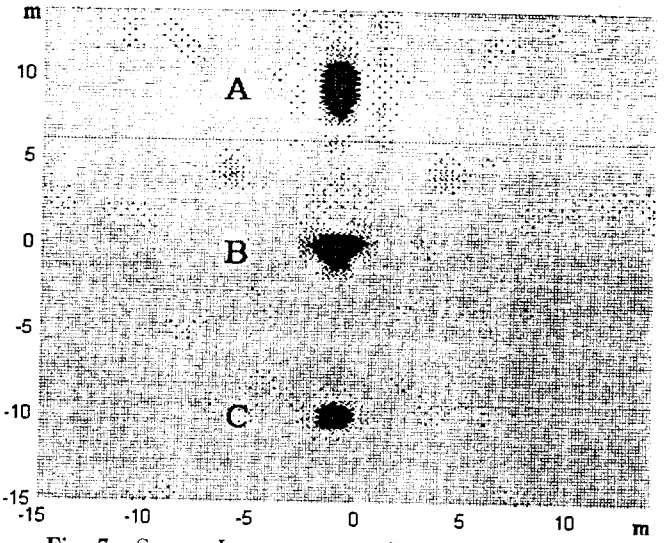

Fig. 7 Source Image processedin rectangular surface. $f=20$m source position: A: $y_1=20$m $y_2=0$m $y_3=10$m B: $y_1=20$m $y_2=0$m $y_3=0$m C: $y_1=20$m $y_2=0$ m $y_3=-10$m

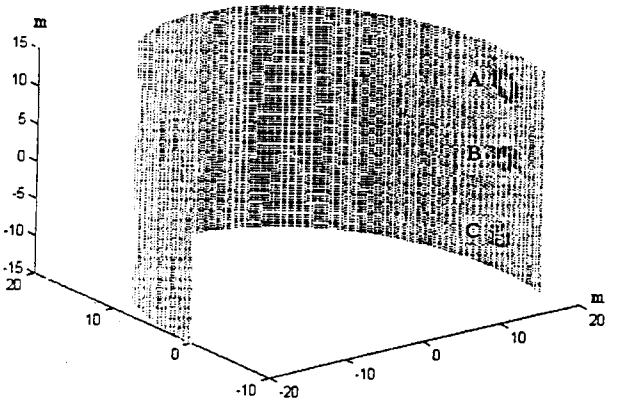

Fig. 8 Source Image processed in circular cylinderical surface. $f=20$m source position: Same as that of Fig. 7

상의 크기가 다르게 나타난다. 즉 그림에서 A는 5 kH B는 7 kHz C는 10 kHz의 대역으로 소음의 대역폭이 작을수록 상관함수의 첨두치 시간대역이 넓게 되어 영상은 크게 나타나는 특성을 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 광대역 소음원의 2차원 영상화를 위한 3차원 배열을 제안하였고 모의실험을 통해 소음원의 영상화가 가능함을 보였다. 3차원 공간에서의 소음원의 동정, 소음표적체 탐지 및 식별 등에 제안된 기법의 응용이 가능하다고 판단되며 추후의 연구방향은 분해능 개선을 위한 prewhitening 기법 도입과 자동차소음원과 같이 소음원의 분포가 이산적이지 않는 분포소음원에 제안된 기술을 응용하는 것이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 '95년도 '해외파견연구교수(일반)연구비 지원에 의한 결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) 김양한, 1996, "소음원 규명 방법론 : 통합된 개념 및 특성들," 한국소음진동공학회지, 제6권, 제6호, pp. 697~700.

(2) S. A. L Glegg & M. J. Buckingham, 1990, "Acoustic Daylight:a New Way to Explore the Ocean ?" Florida Atlantic University.

(3) M. J. Buckingham, S. A. L. Glegg & B. V. Berkhout, 1992, "A New Way Explore the Ocean", NATURE Vol. 356.pp. 327~329.

(4) N. C. Makris, W. A. Kuperman & F. Ingenito, 1992, "Detection of Asubmerged Object Insonified by Surface Noise in an Ocean Waveguide," JASA Vol. 92.p. 2416.

(5) J. R. Potter, Acoustic Daylight 1992 : "Theory and Simulations for an Imaging System Using -Ambient Noise in the Ocean," JASA Vol. 92.p. 2351.

(6) 박상배, 유존하, 이균경, 1994, "상호상관 관계를 이용한 방위 탐지기의 확률적 모델," 전자공학회, 제31권, B편, 제1호. pp. 23~33.

(7) M. Oliveri & S. A. L. Glegg, 1994, "A Broadband Signal Processor for Acoustic Imaging Using Ambient noise," Florida Atlantic University.

(8) J. S. Bendat & A. G Piersol, 1980, "Engr. applications of Correlation and Spectral Analysis," John Wiley & Sons, 1980